

温室及其蓄热层中传热与流动的研究

陈 威 刘 伟 黄 素 逸

(华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要 针对被动式太阳能温室系统, 分析了玻璃顶部覆盖面倾角不同, 对温室中温度及气流分布的影响。温室玻璃顶部覆盖面倾角, 可以改变温室中的气流、温度分布。研究了温室蓄热层传热与流动。温室中土壤或岩床具有吸收并贮存太阳能的作用。

关键词 温室; 太阳能; 蓄热; 传热与流动

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2003)03-0508-03

A STUDY OF CONVECTIVE HEAT TRANSFER IN PASSIVE SOLAR GREENHOUSE WITH HEAT STORAGE

CHEN Wei LIU Wei HUANG Su-Yi

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract In this paper, heat transfer and flow in passive solar greenhouse with heat storage has been studied. The inclined angle of greenhouse roof has effect on temperature distribution and gas flow in space of this greenhouse. Heat transfer and gas flow in rock bed worked as solar absorber and storage layer have also been studied.

Key words greenhouse; solar energy; heat storage; heat convection

1 引 言

太阳能农业温室在全世界范围获得广泛的应用, 取得了较好的经济效益。如何因地制宜地建造和管理农业温室, 一直是国内外研究机构探讨的课题。本文针对温室系统, 首先, 分析温室玻璃顶部覆盖面倾角不同, 对温室中温度及气体流动的影响; 其次, 讨论了温室蓄热层的传热与流动

2 数学物理模型

2.1 物理模型

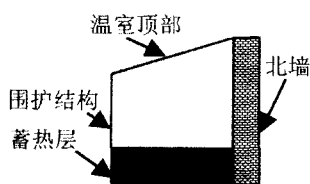


图 1 温室系统示意图

如图 1, 温室坐北朝南。温室顶部向南倾斜, 顶部和东、西、南面为透明玻璃结构; 北墙内为保温材料, 北墙内壁对太阳辐射吸收率较大; 温室底部为蓄热床, 充填土壤或岩石等蓄热介质。

2.2 温室数学模型^[1]

在对温室的温度分布、气体流动进行分析时, 认为 Boussinesq 假设成立, 采用低 Re 数 $k-\epsilon$ 模型连续性方程:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y} =$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S$$

当 ϕ 为 u, v 时, $\Gamma = \mu_{eff} = \mu + \mu_t$ 。 μ 、 μ_t 分别为流体的分子粘性系数和湍流粘性系数。

$$\text{源项 } (u): S = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

$$\text{源项 } (v): S = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial y} \right) +$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \rho g \beta (T - T_C)$$

收稿日期: 2002-12-02; 修订日期: 2003-03-19

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目 (No.G2000026303); 国家自然科学基金资助项目 (No.59976010); 教育部博士点基金资助项目 (No.2000048731)

作者简介: 陈 威 (1968-), 男, 湖北武汉人, 博士研究生, 主要从事太阳能在建筑中应用的研究。

能量方程:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} =$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial T}{\partial y} \right) + S$$

脉动动能 k 方程和脉动动能耗散率 ε 方程:

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y} =$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S$$

当 ϕ 为脉动动能 k 时, $\Gamma = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$; 当 ϕ 为脉动动能耗散率 ε 时, $\Gamma = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}$.

源项 (k): $S = \mu_t G - \rho \varepsilon - 2\mu \left(\frac{\partial k^{1/2}}{\partial y} \right)^2$

源项 (ε): $S = \frac{\varepsilon}{k} c_1 f_1 \mu_t G - c_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} f_2 + 2 \frac{\mu \mu_t}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)^2$

$$G = \frac{\mu_t}{\rho} \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\}$$

$$\mu_t = c_\mu f_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad f_\mu = \exp \left[\frac{-2.5}{(1 + Re_t)/50} \right]$$

$$f_2 = 1 - 0.3 \exp(-Re_t^2), \quad Re_t = \rho k^2 / (\varepsilon \mu), \quad f_1 = 1$$

$$C_\mu = 0.09, \quad C_1 = 1/44, \quad \sigma_k = 1, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3, \quad \sigma_t = 1$$

2.3 蓄热层数学模型

温室内气体流动与蓄热层内气体流动相互影响, 在研究蓄热层内的传热与流动时, 将两者作为一个整体考虑。温室内蓄热层通常为土壤或是岩床, 可视为多孔介质, 可采用 Brinkman-Forchheimer Extended Darcy 模型^[2]。

连续性方程:

$$\frac{\partial(\rho u_d)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_d)}{\partial y} = 0$$

动量方程:

$$\frac{\rho}{\theta} \frac{\partial u_d}{\partial \tau} + \frac{\rho}{\theta^2} \left(u_d \frac{\partial u_d}{\partial x} + v_d \frac{\partial u_d}{\partial y} \right) =$$

$$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_m \frac{\partial u_d}{\partial x} \right) +$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_m \frac{\partial u_d}{\partial y} \right) - \left(\frac{\mu}{K} + \frac{\rho C}{\sqrt{K}} |v_d| \right) u_d$$

$$\frac{\rho}{\theta} \frac{\partial v_d}{\partial \tau} + \frac{\rho}{\theta^2} \left(u_d \frac{\partial v_d}{\partial x} + v_d \frac{\partial v_d}{\partial y} \right) =$$

$$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_m \frac{\partial v_d}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_m \frac{\partial v_d}{\partial y} \right) -$$

$$\left(\frac{\mu}{K} + \frac{\rho C}{\sqrt{K}} |v_d| \right) v_d + \rho g \beta (T - T_c)$$

能量方程:

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + u_d \frac{\partial T}{\partial x} + v_d \frac{\partial T}{\partial y} \right) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_m \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_m \frac{\partial T}{\partial y} \right)$$

其中 u_d 、 v_d 分别表示蓄热层的达西速度; θ 、 μ_m 、 k_m 分别表示蓄热层的孔隙率、有效粘度、表观导热系数; K 、 C 分别表示蓄热层的渗透率、惯性系数; k_s 、 k_g 分别表示空气和蓄热层的导热系数; d_b 表示粒径。 $k_m = (1 - \theta)k_s + \theta k_g$, $\mu_m \mu / \theta$, $K = \frac{d_b^2 \theta^3}{175(1 - \theta)^2}$, $C = \frac{1.75}{\sqrt{175}} \theta^{-3/2}$ 。

2.4 边界条件及初始条件

(1) 温室顶部及玻璃维护结构条件热平衡条件:

$$\eta_h G_{\text{sun}} + Q_{\text{sky}} + Q_{rh} + Q_{rai} + Q_{rao} = 0$$

其中 G_{sun} 为太阳辐射; η_h 为围护结构对太阳辐射吸收系数; Q_{rh} 为因温室内热辐射, 玻璃围护结构所吸收的热量; Q_{rao} 、 Q_{rai} 分别为温室围护结构与温室外、温室内的空气对流换热, Q_{sky} 为温室围护结构与天空辐射交换的热量。

(2) 蓄热层表面条件, 热边界条件:

$$y = h_p \cdot k_m \frac{dT_s}{dy} = \delta \eta_s G_{\text{sun}} A_s + Q_{rs} + Q_{as}$$

其中 η_s 、 δ 分别表示蓄热层表面对太阳辐射的吸收率、温室玻璃对太阳辐射的透过率; T_s 为蓄热层表面温度; Q_{rs} 为由于温室内热辐射; 蓄热层表面所吸收的热量; Q_{as} 表示蓄热层表面与温室内空气的对流换热; h_p 为蓄热层的高度。其它边界条件:

$$u|_{y=h_p^-} = u|_{y=h_p^+}, \quad v|_{y=h_p^-} = v|_{y=h_p^+}, \quad p|_{y=h_p^-} = p|_{y=h_p^+}$$

$$\mu_m \left(\frac{\partial u_d}{\partial y} + \frac{\partial v_d}{\partial x} \right) |_{y=h_p^-} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) |_{y=h_p^+}$$

(3) 蓄热层底部及四周边界: $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$, $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$;

(4) 初始条件: $\tau = 0$, $T = \text{const}$, $u = 0$, $v = 0$;

(5) 气象因素:

$$T_{ao}(\tau) = \overline{T_{ao}} + T_{ar} \cos \frac{\pi}{12} (\tau - 14),$$

$$G_{\text{sun}}(\tau) = \overline{G_{\text{sun}}} \sin \left(\frac{\tau - a}{b - a} \pi \right) \quad (a < \tau < b)$$

其中 $\overline{T_{ao}}$ 、 T_{ar} 分别为环境气温的日平均值、日变幅值; $\overline{G_{\text{sun}}}$ 为太阳日辐射的最大值; a 、 b 分别为日出、日落时刻。本文在数值计算, 所取气象参数 $\overline{G_{\text{sun}}}$ 、 a 、 b 、 $\overline{T_{ao}}$ 、 T_{ar} 分别为 350 W/m^2 、 15° 、 6°C 、6 时、18 时。

3 数值计算与结果讨论

为研究温室顶部倾角对温室内温度及气流分布的影响, 保持温室北墙高度、北墙与围护结构的距

离不变, 改变温室顶部倾角。温室在没有通风时, 是个封闭系统, 温室内气体流动为自然对流。数值计算采用有限差分法。研究蓄热层传热与流动时, 以岩床为数值计算对象。等温线分布图中温度单位为 K。

由图 2~5 可见, 随着温室顶部倾斜角增加, 气流分布逐渐趋向均匀; 温室顶部倾角为 45° 时与倾角为 30° 时相比, 气流、温度分布有明显的改善。因此, 通过改变温室顶部倾角, 可以改变温室内部温度与气流分布。

由图 6~9 可见, 温室在有蓄热层时, 蓄热层所

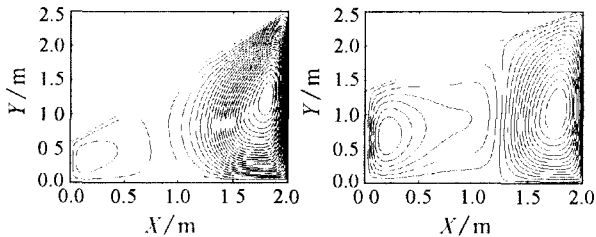


图 2 温室顶倾角 45° 流函数 图 3 温室顶倾角 30° 流函数

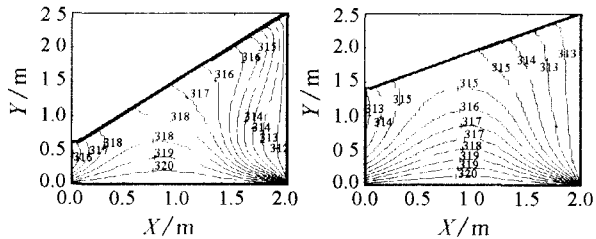


图 4 温室顶倾角 45° 等温线 图 5 温室顶倾角 30° 等温线

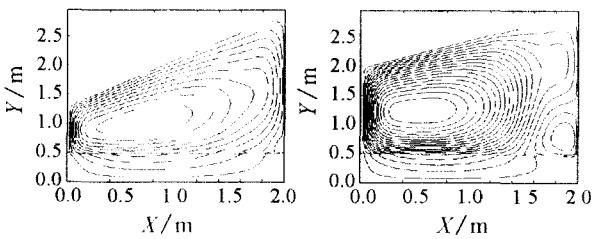


图 6 温室顶倾角 30° 蓄热层粒径 3 cm 温室及蓄热层流函数 图 7 温室顶倾角 30° 蓄热层粒径 3 cm 温室及蓄热层流函数

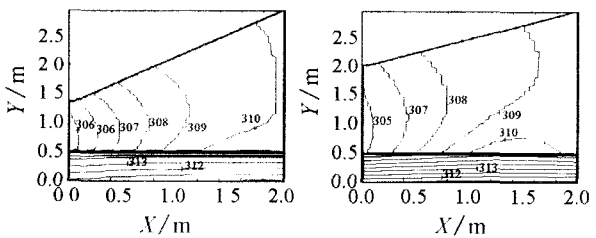


图 8 温室顶倾角 30° 蓄热层粒径 3 cm 温室及蓄热层等温线 图 9 温室顶倾角 30° 蓄热层粒径 3 cm 温室及蓄热层等温线

吸收的太阳能, 一部分传入蓄热层内, 一部分对流传给温室内的空气。温室内温度、气流分布有所改变。温室顶部倾角的改变仍可影响温室内的气流、温度分布。比较图 7 和图 10 可以看出: 在蓄热层孔隙率一定时, 适当增大蓄热层的粒径, 可以增加温室气流对蓄热层的影响。

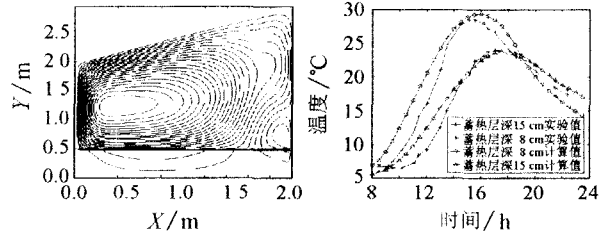


图 10 高温顶倾角 30° 蓄热层 粒径温室及蓄热层流函数 图 11 蓄热层温度计算值与实验值比较

由图 11 可见: 以岩床作为蓄热层时, 不同深度岩床最高点的温度, 随时间逐渐向后推移, 温度最高点的温度值却在下降。在岩床深度为 0.08 m 和 0.15 m 时, 最高点的温度分别为 30° 和 25°, 分别出现在 16 时和 18 时。岩床具有热惯性, 具有蓄热作用。

计算值与实验值在量级和变化趋势上, 基本相吻合, 因而本文采用数学物理模型, 可以有效地描述温室内的传热过程。所得结果为温室的设计、管理提供一定的指导性。

4 实验验证

实验时, 温室内布置了 12 对铜 - 康铜热电偶, 用数字电压表测量。温室室外温度采用水银温度计测量。速度采用微风速测量仪测量。辐射强度由太阳能辐射仪测量。实验数据与计算数据吻合较好 (见图 11)。

5 结 论

在建造太阳能农业温室时, 温室玻璃顶部倾斜角的选取, 应综合考虑环境地理因素、太阳辐射透射到温室内部透射率、温室内气流和温度分布、温室空间的有效利用等因素。以岩床作为温室蓄热层时, 应综合考虑蓄热层的孔隙率和粒径对蓄热的影响。

参 考 文 献

[1] 陶文铨. 数值传热学. 第二版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001
 [2] Sung Jin Kim. Convective Heat Transfer in Porous and Overlying Fluid Layers Heated from Below. Int. J. Heat Mass Transfer, 1996, 39(2): 319-329